

Energía solar en el subsuelo

D. Guinea, P. Peña, D.M. Guinea, O. Hernández, E.Villanueva, D. Martín, M.C.García-Alegre

1 Instituto de Automática Industrial, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 28500 Arganda del Rey. Madrid. Contacto: Domingo Guinea domingo@iai.csic.es

Resumen:

La temperatura del subsuelo, prácticamente constante a partir de una cierta profundidad, o bajo una capa ligera de aislante, coincide aproximadamente en cada región con la temperatura media anual del aire en la superficie. Esto significa que disponemos de una fuente ingente de calor a coste reducido. Además esta temperatura en nuestro clima está solo unos grados por debajo de la denominada "banda de confort" de los edificios.

Por otro lado, frente a una demanda energética de los edificios, que en nuestro clima apenas supera los 100 kWh/m² año (IDAE), la energía solar recibida en cubierta, es 1.600 kWh/m² año. Si la Tierra captura el 50% de la radiación incidente en forma de calor, no resulta técnicamente difícil ni costoso el proceso de captura y almacenamiento en el subsuelo del exceso de energía.

Este trabajo describe la técnica, analizando los resultados de diferentes edificios con acumulación geotérmica selectiva que garantizan en nuestro clima un coste energético próximo a cero para calefacción, refrigeración y ACS, el 70% del consumo total de energía. El modelo analítico de flujo térmico entre las superficies de captura directa bajo cubierta al subsuelo y de este a la demanda del edificio se corrobora con los resultados experimentales obtenidos en un edificio prototipo de dos plantas y 200 m². La gran inercia térmica del subsuelo del edificio ofrece una estabilidad de acumulación plurianual, y una adecuada gestión de la energía reducen drásticamente la demanda de potencia puntual para climatización.

Palabras clave: acumulación geotérmica, vivienda de consumo cero, captura solar térmica y fotovoltaica.

1 INTRODUCCIÓN

El agua y la tierra han proporcionado abrigo a los seres vivos desde el comienzo de los tiempos. Los rigores extremos del clima, difíciles de soportar por el organismo, se amortiguan en las profundidades del mar, el lago o el subsuelo. Nuestra especie sobrevivió durante siglos de fríos inviernos en los períodos glaciares gracias a la inercia térmica de las cavernas. La temperatura de la cueva o bodega sigue conservando hasta nuestros días los vinos y los alimentos protegidos de las heladas del invierno y de los calores del verano.

La herencia de la vida en forma de combustible fósil, antes barato y falsamente inocuo e inagotable, llega a su fin. La técnica parece descubrir que es mucho más eficiente utilizar el suelo, en lugar del aire ambiente, como primario de las máquinas térmicas para los sistemas de climatización. Ahora bien, la temperatura media en el área de Madrid es de unos 15 °C, cerca del promedio en la superficie terrestre, y la banda de confort en el interior de un edificio razonablemente climatizado podemos cifrarla entre 20 °C en invierno y 26 °C en verano. En este contexto parece claro que los 15 °C de la cueva son una fuente directa de refrigeración en verano aunque no tanto si se trata de conseguir un ambiente agradable durante los meses del invierno.

Considerando el gasto promedio y la radiación solar, se puede afirmar que en general en nuestro país, un edificio recibe mucha más energía de la que necesita para su funcionamiento. En este punto surge la pregunta: ¿somos capaces de capturar adecuadamente esta energía para almacenarla y aprovecharla en beneficio del consumo del edificio? Como respuesta, nace la necesidad de crear un sistema energético integral que permita gestionar la energía térmica de forma controlada, siempre que implique un coste de construcción asequible.

Como respuesta se ha desarrollado un nuevo tipo de cerramiento que permite la gestión eficaz de la energía térmica en sus diferentes etapas: la captura, el transporte, el almacenamiento y



la aportación de energía al interior de la edificación de forma controlada para satisfacer las necesidades de sus ocupantes.

Desde un punto de vista térmico, los muros y la cubierta del edificio constituyen una superficie envolvente destinada a mantener su interior a una temperatura de confort, entre 20 °C y 26 °C, a pesar de las notables variaciones diarias o estacionales del exterior. Dos aspectos claves determinan el comportamiento térmico del edificio frente a las variaciones del ambiente: la capacidad de aislamiento de su envolvente y la inercia térmica de su interior.

2 EL AISLAMIENTO

La ley de Fourier establece una relación lineal entre la fuga de energía a través de la envolvente y la diferencia de temperatura interior-exterior del edificio. Así, la transferencia de calor por conducción en una dirección dada, es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección.

$$\frac{dQ_x}{dt} = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

Donde $\frac{dQ_x}{dt}$ es la variación de energía en el tiempo que atraviesa el área A en la dirección x, o potencia perdida a través del cerramiento, la constante de proporcionalidad k o λ se denomina conductividad térmica, T es la temperatura y t el tiempo. Ahora bien, la energía que fluye al o desde el edificio influye en la variación de su temperatura en función de su inercia térmica, y ésta queda determinada por la masa y el calor específico, o calor latente en su caso, de los materiales que constituyen su interior.

Con una tolerancia de 3 °C, la calefacción, representada por un generador y la resistencia de perdidas asociada, se activará cuando la temperatura, del interior descienda por debajo de los 20 °C. La potencia aportada será proporcional al salto térmico entre la temperatura ambiente y el límite inferior de la banda multiplicada por el flujo de energía.

Por el contrario, el circuito de refrigeración se activará siempre que la temperatura del interior supere los 26 °C. De forma similar, la potencia exigida para refrigerar se determina por la energía aportada por esta fuente, proporcional al salto térmico sobre la banda de confort por el flujo térmico. La energía total consumida en climatización interior será la integral a lo largo del período estudiado de las aportaciones para calefacción y refrigeración.

El gráfico de la Fig. 1 muestra las curvas de la potencia necesaria y energía total para climatizar a lo largo de un día según este criterio y diferentes valores en el aislamiento del edificio.

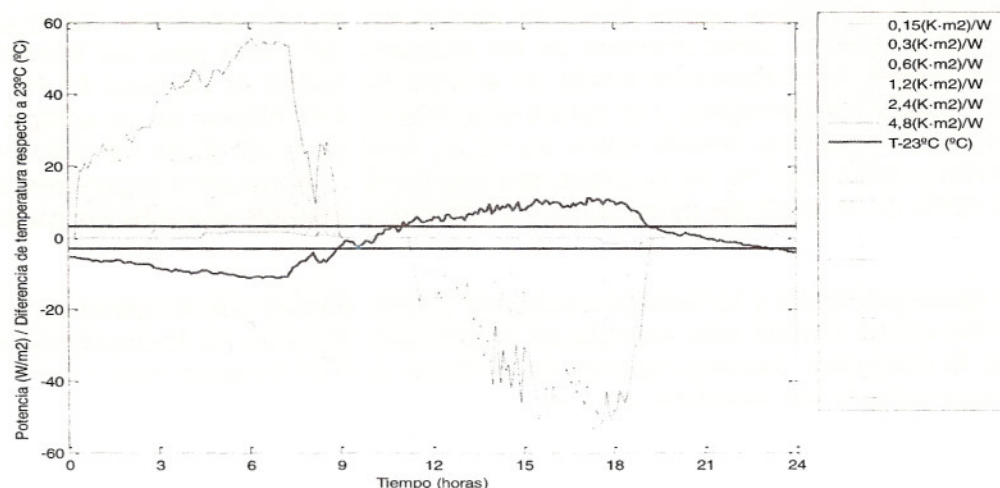


Figura 1. Temperatura de un día de primavera, con la banda de confort entre 20 y 26 °C y la potencia de climatización para diferentes aislamientos en la envolvente, con muros de medio (0,15 km²/W azul) a 16 pies (4,8 km²/W).

Se observa que un incremento del aislamiento no sólo implica menores potencias, sino que también las necesidades de calefacción y refrigeración se produzcan más tarde, ya que en ese caso la inercia térmica de la vivienda es capaz de guardar el calor generado durante más tiempo. Así, aislamientos mayores pueden alcanzarse con mayores espesores de pared y mejores aislantes. Por ejemplo, debido a la diferencia en su conductividad, la resistencia térmica de 4,8 K/W propia de un muro de ladrillo de 16 pies de grueso equivale a la de una capa de solo 18 cm de poliestireno expandido.

Es evidente que hay una relación directa entre el aislamiento y la potencia necesaria para climatizar el edificio. Por tanto, será preciso aportar energía durante el invierno y refrigerar durante el verano aunque en cantidades menores que las requeridas en una construcción peor aislada. Si bien aumentando la capacidad aislante de la envolvente disminuimos las pérdidas de energía del edificio, incrementado su masa térmica podemos equilibrar, a lo largo del tiempo, el calor en exceso con los períodos en que éste se demanda por el frío.

Energías de calefacción y refrigeración para distintos aislamientos

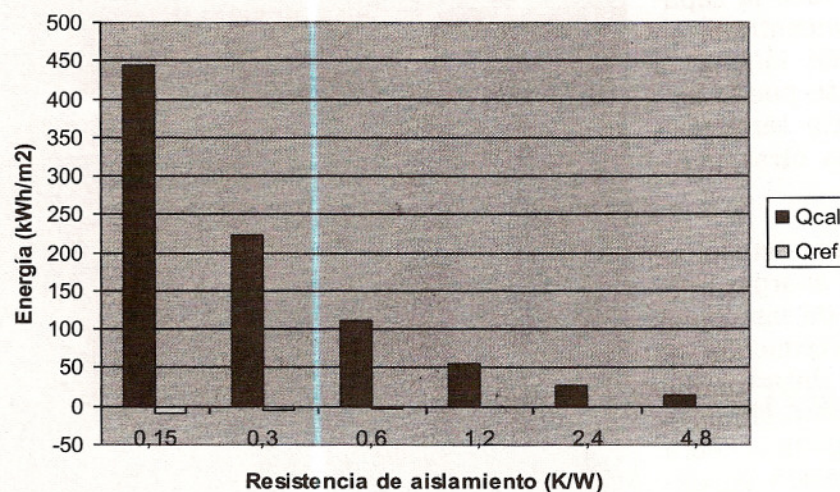


Figura 2. Energía por m² de cerramiento para calefacción (rojo) y refrigeración (azul) para diversos valores del aislamiento.

Es importante resaltar que la variación en la conductividad térmica de los materiales usualmente empleados en la construcción, desde aislantes como el poliestireno o poliuretano, hasta los metales como el aluminio o el acero, varía en un rango de cuatro órdenes de magnitud. Por el contrario, el calor específico y la densidad para este tipo de materiales apenas varían en una décima. Ello implica que existe la posibilidad de encapsular o encauzar los flujos térmicos mediante el adecuado diseño espacial de materiales conductores y aislantes.

3 EL ALMACENAMIENTO O INERCIA TÉRMICA

La ley de Fourier se cumple en régimen estacionario o cuando la masa térmica de los materiales es muy pequeña, por lo que la variación de energía en el material con la variación de la temperatura es despreciable. Menos conocida que el aislamiento, y sobre todo menos utilizada, es la posibilidad de modificar la inercia térmica de la edificación, o capacidad de almacenamiento por unidad de volumen, que es parecida de unos a otros materiales, siempre que no se alcance su temperatura de cambio de fase. Cabe mencionar en este punto las interesantes posibilidades que ofrece el diseño de materiales que fundan a una temperatura deseada (MCF o PCM), por ejemplo dentro de la banda de confort.

Ahora bien, los materiales comunes se pueden utilizar como almacén de calor sensible, aquel que modifica su temperatura. En este caso, su coste y oportunidad de uso parece mucho más



importante que su capacidad de almacenamiento de calor, determinada por el producto densidad por calor específico y que varía en un intervalo limitado.

Por ello, parece rentable acudir a elementos aislantes o conductores especializados para impedir o propiciar el flujo térmico mientras que cualquier elemento constructivo, incluyendo el propio terreno en que se asienta el edificio, puede constituir un buen acumulador cuya capacidad estará determinada sobre todo por el volumen de material involucrado en el intercambio térmico. Las características de los materiales actuales permiten una construcción muy ligera, lo que limita la inercia o estabilidad térmica del interior del edificio. Un circuito de intercambio de calor con una gran masa, como puede ser el subsuelo bajo el mismo edificio, puede incrementar su inercia hasta el valor deseado sin mayores dificultades técnicas o económicas.

En régimen dinámico, una parte del calor que atraviesa un material se emplea en variar su propia temperatura. Partiendo de un tipo de terreno con densidad, conductividad térmica y calor específico determinado, es necesario analizar la propagación de la onda térmica. Para modelar el comportamiento del suelo, se propone dividirlo horizontalmente en láminas de profundidad creciente. Como aproximación, se parte de la hipótesis de que toda la capacidad se haya concentrada en el centro de cada lámina, a partir de lo cual se puede calcular la resistencia térmica a los centros de las otras láminas o al exterior.

A continuación se detalla el mejor uso de la energía mediante el control de las capas activas de un cerramiento de piel múltiple en intercambio con el subsuelo como almacén de energía geotérmica. Para su mejor comprensión se explica el planteamiento mediante el análisis de los perfiles de temperatura ambiente, diarios, mensuales y anuales frente a la banda de confort en el interior de una edificación habitable. Es claro que la cantidad de calor almacenada será proporcional a la densidad y al calor específico del material; y la velocidad en la difusión de la energía vendrá dada por su conductividad.

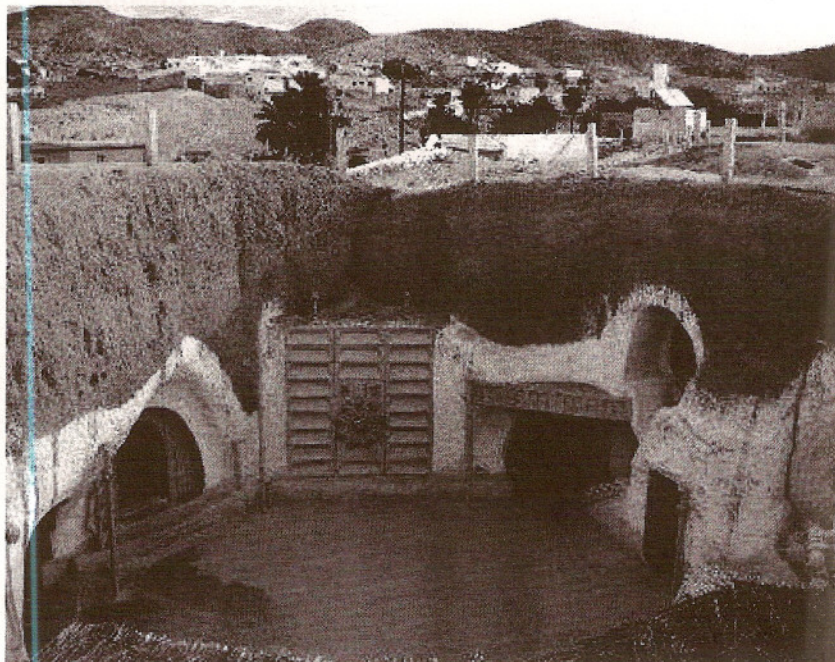


Figura 3. Vivienda subterránea de Luke Skywalker en "La Guerra de las Galaxias".

Indudablemente una cueva o vivienda subterránea tiene un entorno térmico de referencia extraordinariamente estable y precisa una aportación continua de calor capaz de elevar hasta el nivel de confort la temperatura del terreno.

En el caso de una vivienda subterránea próxima a la superficie o de gruesos muros, el calor solar queda filtrado y retardado por la capa de terreno situada entre el interior y el exterior. Los cerramientos de tapial o piedra de los viejos edificios ofrecen una función similar, estabilizando la temperatura del interior cerca del promedio de la zona, lo mismo que una cueva.

En el caso de una vivienda subterránea próxima a la superficie o de gruesos muros, el calor solar queda filtrado y retardado por la capa de terreno situada entre el interior y el exterior. Los cerramientos de tapial o piedra de los viejos edificios ofrecen una función similar, estabilizando la temperatura del interior cerca del promedio de la zona, lo mismo que una cueva.

En estos casos, la onda térmica debe atravesar una gruesa capa de material de notable densidad y calor específico con una conductividad limitada. Ello filtra las perturbaciones diarias, originando una fuerte atenuación y un importante retardo entre la temperatura exterior y el momento en que se ve afectado el interior de la vivienda. Ajustando el espesor y las características de los materiales de recubrimiento, es posible conseguir un retardo de varios meses, hasta el punto de que el máximo de temperatura estival alcance el interior durante lo más crudo del invierno, tal como se muestra en la Fig.4.

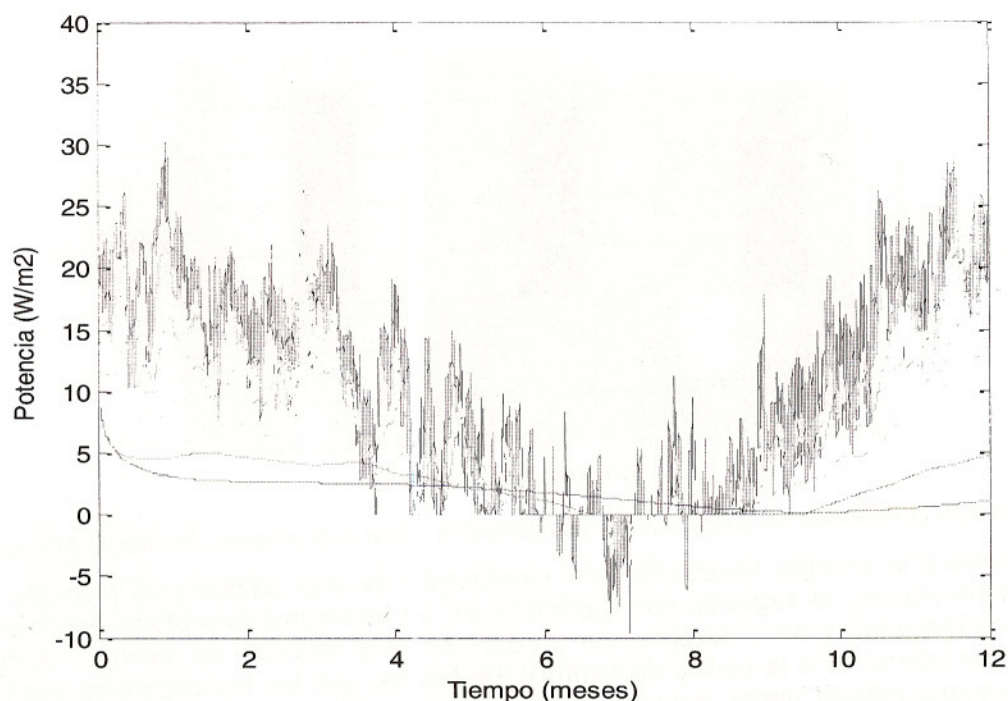


Figura 4. Atenuación, retardo y potencia de climatización en una casa enterrada con la banda de confort a 23 °C.

En la Fig. 4 se muestra la variación anual de la temperatura ambiente y las diferentes gráficas, del azul al rojo, muestran la potencia necesaria para mantener el interior dentro de la banda de confort para diferentes espesores de la capa de tierra, muestreados de forma que cada uno es el doble del anterior, en el intervalo de 0,15 a 4,8 m. En color verde se representa la temperatura exterior. En azul, azul verdoso, verde, amarillo, naranja, rojo y magenta las potencias a generar en el interior para espesores de 0,15 m, 0,3 m, 0,6 m, 1,2 m, 2,4 m y 4,8 m, respectivamente, bajo la hipótesis de una conductividad de 1 W/(m·K) y una capacidad de 1.800.000 J/(m³·K). De aquí en adelante, para todos los modelos que se presentan, incluyendo también el almacenamiento térmico, se utilizarán estos valores.

Se observa que cuanto mayor es el espesor de enterramiento, mayor es el amortiguamiento de las oscilaciones térmicas diarias o estacionales. Para altos espesores, se observa un desfase entre la temperatura exterior y la generación de potencia en el interior. De hecho, la generación mínima en el interior para un espesor de 4,8 m se presenta en la segunda mitad de octubre, mientras que el máximo en temperatura ocurre en julio y agosto.

Si bien la ventilación o la humedad pueden evitarse en una caverna, en su construcción y uso, el movimiento de tierra, la nula visión del exterior y la opresión de la cueva hacen que hoy en día estos edificios sean inusuales. La masa de un cerramiento ligero, incluyendo la del interior del edificio puede ser despreciable en comparación con una capa del espesor adecuado en el terreno que sustenta el edificio, accesible mediante un circuito térmico. Una vez conocida la cantidad de energía y la potencia que el edificio precisa a lo largo del año, es posible determinar el volumen de terreno y las características del intercambiador de calor entre el subsuelo y el interior del edificio capaz de proporcionarlas.

Mediante el circuito térmico adecuado es posible situar la inercia térmica dentro del edificio sin dotar necesariamente a sus muros y forjados de una masa extraordinaria. Su efecto es suavizar o promediar las variaciones de la temperatura exterior de forma que a medida que aumenta la masa térmica del terreno involucrada como acumulador, desaparece de forma patente en nuestro clima la necesidad de refrigeración. Como en el caso anterior al involucrar un volumen grande de terreno como estabilizador desaparecería la necesidad de refrigeración en verano, tal y como sucede en el interior de un pozo o cueva.

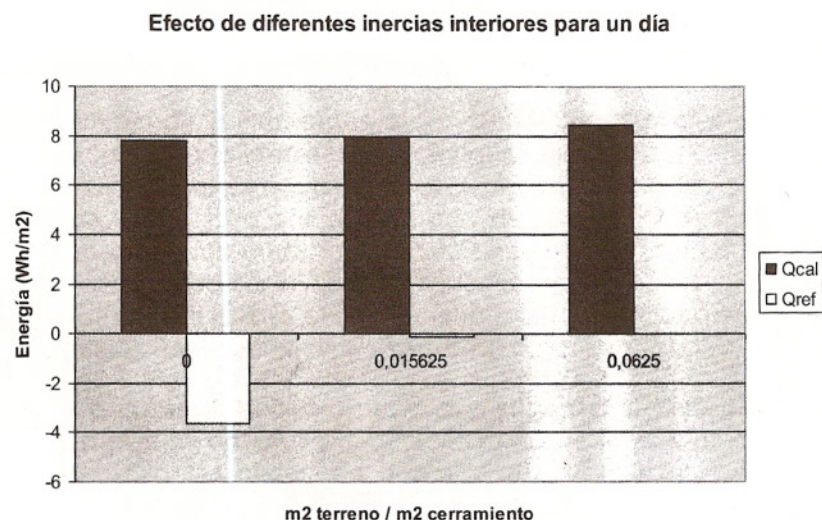


Figura 5. Energía consumida en calefacción y refrigeración para tres valores de inercia térmica interior.

La Fig. 5 muestra la energía necesaria para calefacción de tres edificios, el primero sin intercambiador subterráneo, el segundo con 0,015625 m² de intercambiado plano en el terreno por cada m² de cerramiento y en el tercero con 0,0625. En este ejemplo se parte de temperaturas del acumulador inferiores a la banda de confort. De hecho, son las temperaturas que existirían si la casa hubiese estado antes durante un año entero a 20 °C. Se observa que el uso del acumulador, aunque sea pequeño, disminuye la necesidad de calefacción e incluso la hace desaparecer. En cambio aumenta el consumo de calor de calefacción debido a las pérdidas del interior del edificio por difusión subterránea de calor.

Si la inercia o masa térmica se sitúa en el exterior de la vivienda se produce una atenuación y un retardo entre la onda térmica exterior y la temperatura del interior. Por el contrario, si el almacenamiento se produce dentro del edificio, sólo aparece un promediado o "resistencia al cambio" de la temperatura, proporcional al volumen de terreno involucrado. Es de especial interés el caso en que el efecto de inercia se introduce dentro del cerramiento de forma que una parte del aislante queda hacia el exterior y otra hacia el interior de la denominada "barrera térmica activa" utilizada por ejemplo en la tecnología ISOMAX.

El almacenamiento exterior parte de una temperatura próxima a la media de la zona, la temperatura interior debe mantenerse dentro de la banda de confort. El circuito térmico entre dos capas aislantes del cerramiento permite el uso eficaz de energía acumulada a temperaturas situadas entre las dos anteriores.

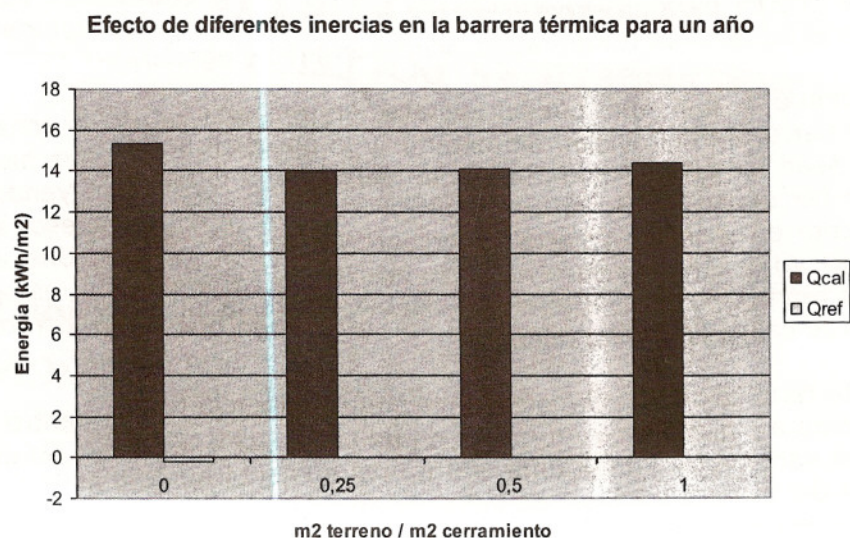


Figura 6. Potencia de climatización para diferentes masas térmicas en la barrera, debidos a uno, dos y tres intercambiadores térmicos de la misma superficie introducidos a diferentes niveles del subsuelo.

Se observa que el empleo de una barrera térmica reduce el calor a aportar en calefacción y lo elimina en refrigeración. Por otra parte, también se observa que conforme aumenta la capacidad de la barrera térmica, aumenta el calor que hay que aportar en calefacción.

Efecto posiciones de la barrera térmica para un año

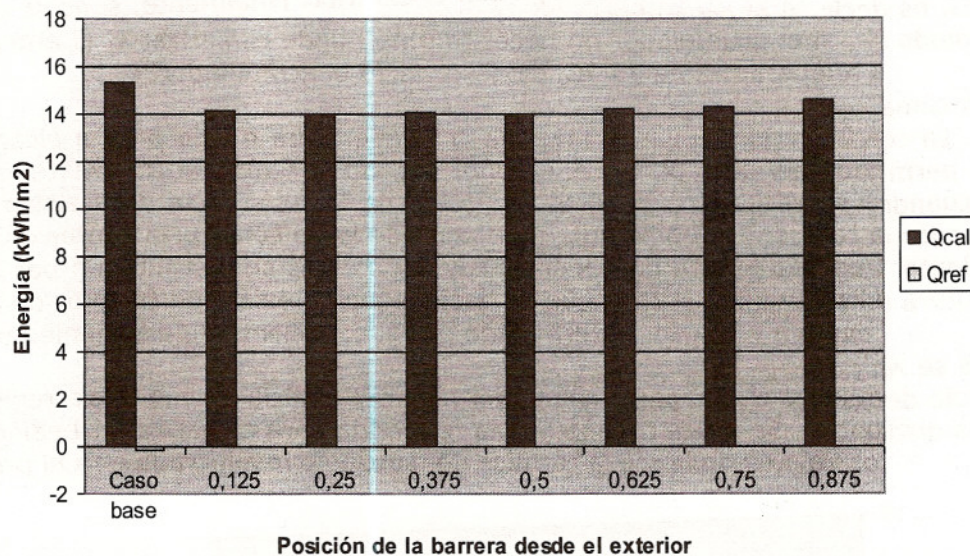


Figura 7. Potencia de climatización para diferentes relación de aislamiento interior-exterior.

La Fig. 7 muestra la potencia de climatización a lo largo del año para diferentes posiciones de la barrera térmica dentro del aislamiento del edificio. Se observa que hay un intervalo óptimo en la posición de la barrera: partiendo desde el exterior, este intervalo es a una resistencia de entre un cuarto y la mitad, aproximadamente, de la resistencia térmica total. Colocar lo más hacia el exterior, provocará que la temperatura de la barrera térmica siga a la del exterior, con lo que se perdería el efecto integrador. En cambio, si se coloca más hacia el interior, habrá importantes pérdidas hacia la barrera térmica, ya que la resistencia térmica entre el interior y la barrera térmica bajará.

Los últimos sistemas descritos suponen una aportación activa de flujo térmico entre el subsuelo y el interior del edificio o incluso dentro del aislante que constituye la envolvente. Se observa que con estos sistemas no controlados, se pueden lograr reducciones en el consumo energético, pero estas reducciones están limitadas. Con buenos aislantes sólo se puede conseguir mantener el calor durante ciclos térmicos del orden de un día. Empleando el subsuelo, se consiguen amortiguaciones mayores, pero también se pierde una importante cantidad de energía en calentarlo. Estas limitaciones aconsejan el empleo de sistemas más complejos en los cuales se pueda controlar el flujo térmico.

4 El control del flujo térmico

Un buen aislamiento en el cerramiento del edificio supone una beneficiosa reducción de las pérdidas a su través pero, al tiempo, limita la cantidad de energía accesible para su almacenamiento interior. Un sencillo control establece la posibilidad de conmutar el circuito térmico del acumulador subterráneo con el interior o con el exterior del cerramiento.

La estrategia de conmutación se basa en, primero, intentar utilizar el acumulador para calentar o refrigerar la vivienda si es necesario y posible. Por tanto, si la temperatura de la vivienda está por debajo de la banda de confort y el acumulador está más caliente que la vivienda, se conecta esta capa a la vivienda, para que la caliente. Igualmente, si la temperatura de la vivienda es superior a la de confort y el acumulador está a una temperatura inferior a la de la vivienda, se conecta esta capa al acumulador para que la enfríe.

Si no se da ninguno de estos casos, se intenta poner el acumulador a 25 °C (en la zona superior de la banda de confort, ya que las necesidades de calefacción son superiores a las de refrigeración). Para ello, si la temperatura de la capa superior del acumulador es inferior a 25 °C y la temperatura exterior es superior a la de esta última capa, se conecta el acumulador al ambiente exterior, para que el segundo caliente al primero. De igual forma, si la temperatura de la capa superior del acumulador es superior a 25 °C y la temperatura exterior es inferior a la de ésta capa superior, se conecta ésta capa con el exterior. Finalmente, si no se da ninguno de estos casos, es decir, si el acumulador no necesita o no puede climatizar el anterior, ni puede ser aproximado a la temperatura de 25 °C, se desconecta el acumulador.

En nuestro clima será preciso elevar el nivel de la temperatura media para alcanzar la banda de confort. La conexión del acumulador al exterior cuando la temperatura exterior supere a la de confort permitirá su carga sin la fuerte reducción de la resistencia de aislamiento. Por el contrario, cuando la temperatura ambiente desciende de la de confort, la conexión del acumulador al interior del edificio aporta una energía cuyas pérdidas se restringen por la resistencia del cerramiento. Es importante resaltar que en este esquema existe un factor de amplificación entre la captura de energía y su uso, determinado por el coeficiente de aislamiento del edificio.

En la Fig. 8 se representa el comportamiento térmico del edificio en nuestra región siguiendo este protocolo de control. Se muestra la potencia requerida para climatizar el edificio a lo largo del año para distintos valores de la masa térmica del subsuelo involucrada en el proceso.

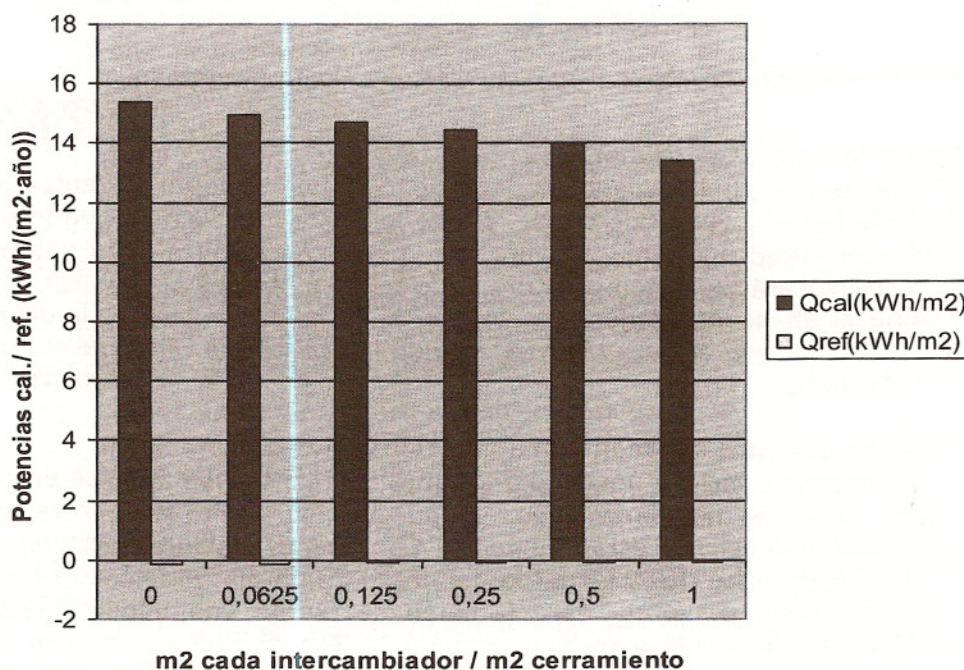


Figura 8. Conmutación, temperatura y potencia anual.

Se observa una disminución significativa en la potencia requerida de calefacción y de refrigeración al poner los depósitos conmutables. A diferencia de cuando se emplea un sistema pasivo, en este caso, salvo ligeros retardos del sistema de control, nunca se emplea calefacción de la vivienda para calentar el suelo. Siempre que este proceso cíclico de carga estival y uso invernal del acumulador permita un remanente neto positivo a lo largo del año, la temperatura del acumulador puede ir subiendo acumulativamente hasta alcanzar la banda de confort. Una vez conseguido, el proceso de conmutación ha de estabilizar la temperatura, cargando el subsuelo durante el verano hasta el límite máximo de confort. Esta energía se aprovechará en el interior del edificio durante el invierno con una temperatura que descenderá, lentamente gracias a la capa aislante, hasta la primavera siguiente. La diferencia en la constante de tiempo de los procesos de carga y descarga del acumulador viene establecida por la resistencia de aislamiento del edificio que ralentiza el proceso de descarga al interior frente al de carga directa desde el exterior.

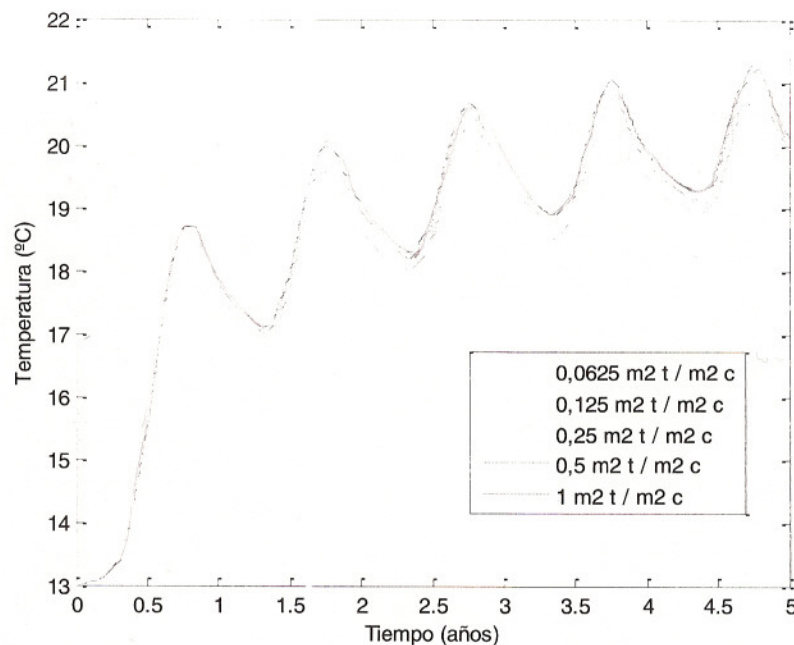


Figura 9. Incremento acumulativo de la temperatura del acumulador en 5 años (temperatura de la capa situada entre 0,75 m y 1,55 m).

Se observan fluctuaciones en la temperatura debidas a los ciclos de carga y descarga del acumulador. Sobre estas fluctuaciones se superpone una tendencia media ascendente, debido a la carga progresiva del acumulador a lo largo de los años (especialmente de las capas inferiores, que al cargarse pasan a absorber menos calor, permitiendo por tanto mayores temperaturas en las capas superiores). Aunque las gráficas son similares, se observa que cuanto mayor es la capacidad térmica del acumulador, mayor es la temperatura. Esto probablemente se debe a que el acumulador no se descarga tan rápidamente a la casa, con lo que da tiempo a que una proporción mayor del calor absorbido se transmita hacia el subsuelo, y vaya calentándolo progresivamente.

5 CONCLUSIÓN

Tanto los modelos térmicos como las medidas realizadas en distintos climas demuestran que una drástica reducción del consumo energético en los edificios es técnica y económicamente viable. La captura de energía en la envolvente y su acumulación en el subsuelo han de ser gestionados de forma que aseguren un clima interior dentro de la banda de confort durante todo el año.

6 AGRADECIMIENTOS

Los siguientes proyectos han financiado el desarrollo y prototipos que aquí se resumen:

- EXPOAGUA 2008 ZARAGOZA.
- MICINN P.S.E INVISIO Industrialización de la vivienda sostenible PSE-380000-2008-6.
- CSIC PIE Generación de hidrógeno a partir de residuos orgánicos Ref. 2004 8 0E 254.
- Diseño y realización de una nueva Pila de Combustible polimérica de bajo coste y alta eficiencia". MCYT- ENE2005-09124-C04-02/ALT.
- Pila de combustible en una arquitectura inteligente de control para su integración en un sistema energético autosuficiente CICYT-ENE2008-06888-C02-02.